

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет

Кафедра оптики



ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

«Влияние скорости течения газа на электрофизические параметры
барьерного разряда при формировании гелиевой плазменной
струи атмосферного давления»

Направление: 010900 – Прикладная
физика и математика

Выполнил(а) студент(ка):

Халикова Л.Р.

4 курса бакалавриата

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., доцент Кудрявцев А.А.

Рецензент:

к.т.н., ведущий научный сотрудник

Института электрофизики

и электроэнергетики РАН

Пинчук Михаил Эрнестович

Санкт-Петербург

2017

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Слаботочный газовый разряд атмосферного давления: условия инициирования, свойства.....	6
1.1. Коронный разряд.....	6
1.2. Барьерный разряд.....	10
1.3. Условия формирования плазменной струи.....	12
Глава 2. Генерация плазменной струи на основе барьерного разряда в потоке гелия.....	15
2.1. Экспериментальная установка для генерирования плазменной струи на основе барьерного разряда в потоке гелия.....	15
2.2. Газодинамические условия формирования плазменной струи....	18
2.3. Электрические измерения параметров разряда.....	22
2.4. Методика расчета энергетических характеристик разряда.....	28
Глава 3. Влияние скорости газового потока на электрические и энергетические характеристики барьерного разряда при генерировании гелиевой плазменной струи.....	30
3.1. Влияние скорости газового потока на формирование гелиевой плазменной струи в окружающем воздухе.....	30
3.2. Влияние скорости газового потока на электрические и энергетические характеристики барьерного разряда в потоке гелия.....	33
Выводы.....	37
Заключение.....	38
Список литературы.....	40
Приложение.....	43

Введение

В настоящее время бурно развивается новая междисциплинарная область науки и техники плазменная медицина [1]. Она основана на использовании струй холодной (т.е. с температурой газа порядка комнатной) газоразрядной плазмы атмосферного давления, которая имеет ряд важных преимуществ перед другими аналогичными способами воздействия на биологические объекты благодаря своей селективности и «мягкому» неразрушающему воздействию. В литературе можно найти большое количество публикаций, которые свидетельствуют об эффективности деструктивного действия плазмы на культуры бактериальных клеток и их биоплёнки, а также о её ранозаживляющих и стимулирующих регенерацию тканей свойствах [2], [3], [4]. Стали появляться статьи, в том числе обзорные, о возможностях применения генераторов плазменных струй в отдельных областях медицины: стоматологии [6], [7] и хирургии [8], дерматологии [9] и др. В этих работах фокус внимания направлен на выявление способов управления результатом её действия на биологические объекты.

Однако, несмотря на то, что ранее уже были выявлены некоторые закономерности в генерировании холодной плазменной струи барьерного разряда в потоках инертных газов, сегодня часто приходится возвращаться к ним, уточнять и систематизировать факторы, определяющие

эффект плазменного воздействия на биологический материал. Одним из важных рабочих параметров генератора плазменной струи является скорость газового потока, в котором она формируется. Очевидно, что условия газонапуска отвечают за формирование плазменной струи в окружающем воздухе, но также они могут влиять и на характеристики разряда.

В настоящей работе выполнены эксперименты по проверке гипотезы влияния скорости течения газа на электрические и энергетические параметры барьерного разряда в потоке гелия. Более конкретно, цель работы заключалась в определении влияния скорости газового потока (режима течения газа) на формирование гелиевой плазменной струи в окружающем воздухе и в выявлении закономерностей влияния скорости газового потока на электрические и энергетические характеристики барьерного разряда.

Для этого были решены следующие задачи:

- 1) анализ данных о влиянии газодинамических условий формирования гелиевой плазменной струи (объёмного расхода газа, скорости газового потока) на её длину и определение условий газонапуска для формирования ламинарного и турбулентного режимов течения газа;
- 2) постановка и выполнение экспериментов по осциллографированию барьерного разряда в ламинарных и турбулентных потоках гелия;

- 3) обработка осциллограмм, анализ электрических параметров разряда в зависимости от режима течения газа;
- 4) расчёт энергетических параметров барьерного разряда и выявление их зависимости от скорости газового потока;
- 5) анализ полученных данных, выявление закономерностей.

Глава 1. Слаботочный газовый разряд атмосферного давления: условия инициирования, свойства.

В настоящей главе рассмотрен обзор литературных данных. В первом и во втором параграфах описываются коронный и барьерный разряд: их структура, принцип формирования. В третьем параграфе рассматриваются условия формирования плазменной струи.

1.1 Коронный разряд

Плазма представляет собой ионизованный газ, обычно генерируемый при высоких температурах в лабораторных условиях. Работы последних лет в области плазмы атмосферного давления привели к генерации плазмы с температурой, близкой к комнатной [10], а более ранние исследования демонстрируют неагрессивный характер такой плазмы [11] при взаимодействии с органическими материалами, по результатам многочисленных работ становится ясно, что возрастает роль холодной плазмы в такой сфере, как биомедицина, где термический аспект взаимодействия имеет большое влияние на результат, поэтому необходимо учитывать энергетические характеристики генерируемых разрядов в плазме, такие как ток, мощность, энерговыделение. Поэтому слаботочные разряды представляют наибольший интерес для практического применения.

К слаботочным газовым разрядам атмосферного давления относятся коронный и барьерный разряды.

Коронный разряд возникает в сильно неоднородном электрическом поле, которое можно получить между двумя электродами, поверхность одного из которых обладает большой кривизной (тонкая проволока, острие иглы). Наличие второго электрода не обязательно, его роль могут играть окружающие заземленные объекты. Когда электрическое поле вблизи электрода с большей кривизной достигает примерно $2 \cdot 10^6$ В/м, вокруг этого электрода возникает свечение, имеющее вид оболочки или короны, откуда и произошло название разряда [12]. Коронный разряд, по определению, самостоятельный газовый разряд, в котором из-за особенностей геометрии системы электродов процессы ионизации локализованы в поле высокой напряженности, в окрестности активного электрода. При внесении в межэлектродный промежуток одной или нескольких диэлектрических вставок, искажается электрическое поле, добавляются новые факторы, влияющие на зону высокого напряжения, а также изменяется траектория распространения электронов [13].

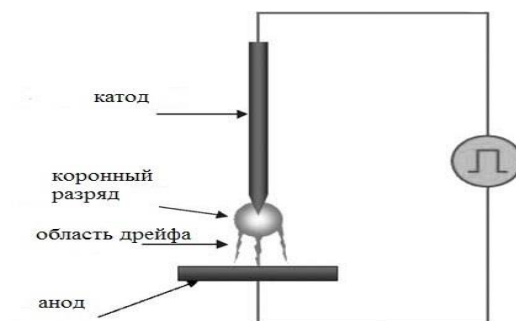


Рис. 1. Коронный разряд.

При размещении твердого диэлектрика во внешней области коронного разряда можно повлиять на процессы, происходящие в области коронного разряда, за счет осаждения на поверхности диэлектрика заряда, имеющегося во внешней области короны.

Чтобы уменьшить ток коронного разряда, можно во внешней области коронного разряда поставить твердый диэлектрик, например, в середине межэлектродного промежутка. Диэлектрик поляризуется под действием поля. Кроме того, установленный диэлектрик преграждает путь потоку ионов во внешней зоне короны, и на нем осаждаются поверхностный заряд ионов, дрейфующих во внешней зоне. Поле, которое при этом создает поверхностный заряд на диэлектрике, противодействует полю электрода и тем самым препятствует образованию затравочных электронов, инициирующих коронный разряд. Другими словами, можно сказать, что поле перераспределяется и сосредотачивается в диэлектрике, а

приэлектродные процессы, образующие коронный разряд, уменьшаются или прекращаются.

Если размещать диэлектрическую вставку внутри предполагаемой границы области короны, то можно изменить траектории движения электронов, создающих лавины и таким образом повлиять на структуру области коронного разряда. Кроме того, диэлектрическая вставка при положительной полярности острия может ограничить приток затравочных электронов из окружающего пространства к коронирующему электроду и, следовательно, может изменить напряжение зажигания коронного разряда. Наряду с этим можно повлиять и на процессы вторичной электронной эмиссии путем нанесения диэлектрических покрытий непосредственно на поверхность коронирующего электрода.

Таким образом, на разрядные процессы может повлиять не только наличие диэлектрика в межэлектродном промежутке или на поверхности электрода, но и его форма, а также свойства диэлектрика и свойства границы раздела диэлектрик – газ. Диэлектрические барьеры используют для повышения пробивного напряжения в газовых коммутационных устройствах. Поэтому барьерный эффект широко исследуют для постоянного, переменного, а также импульсного напряжений [12].

1.2 Барьерный разряд

Барьерный разряд - это особая форма электрического разряда высокого давления (порядка атмосферы и выше), возникающего в среде между электродами, когда хотя бы один из них покрыт диэлектриком (стеклом, кварцем, керамическим или полимерным материалом). Наличие диэлектрика обуславливает питание переменным током. Электрический пробой такого газового промежутка при приложении высокого напряжения происходит в виде серий микроразрядов. Длительность одной серии равна десятым долям микросекунды ($0,1 \div 0,2$ мкс); длительность отдельного микроразряда ($10 \div 30$ нс), т.е. составляет десятки наносекунд. Время между отдельными сериями зависит от напряжения и длины газового промежутка и примерно на три порядка больше длительности отдельной серии. Отдельные каналы не закреплены в определенных точках, а распределяются случайно [14]. Такой разряд является неустановившимся, сильно неравновесным, который может существовать в широком диапазоне давлений. При давлениях порядка атмосферного размеры межэлектродного промежутка обычно делают малыми (от 0,1 до нескольких миллиметров). Под действием приложенного к электродам переменного напряжения происходит пробой газа, и появляются импульсы тока, приводящие к быстрому накоплению зарядов на диэлектрике. В результате уменьшается разрядное

напряжение, ограничивается длительность микроразрядов, и газ не успевает нагреться, основная часть электрической энергии расходуется на возбуждение атомов и молекул газа и на излучение – разряд светится.

Различают поверхностный (рис. 2а) и объемный барьерный разряд (рис. 2б). Для получения объемного барьерного разряда электроды имеют конфигурацию двух металлических пластин или полос, разделённых разрядным промежутком. Одна из них или обе изолированы от промежутка диэлектрическим слоем. В случае поверхностного барьерного разряда оба электрода размещены на одной стороне диэлектрической пластины, а разряд горит между ними в газе по другую сторону диэлектрика вблизи его поверхности. Для пробоя газа используется вспомогательный электрод, также изолированный от газа другим диэлектриком [15].

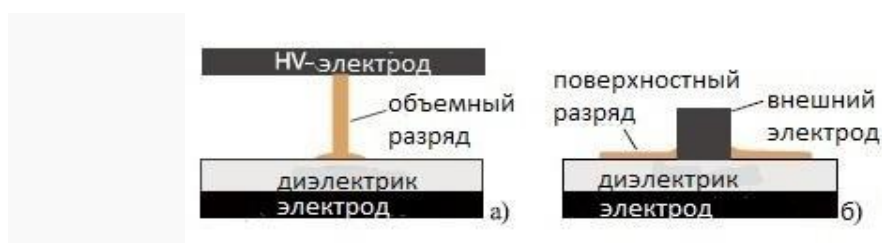


Рис. 2. Формы существования барьерного разряда: а) объемный, б) поверхностный.

1.3 Условия формирования плазменной струи

Плазменная струя образуется в разряде (дуговом, радиочастотном, барьерном и т. д.) (рис. 3) и выбрасывается через узкое сопло (круглое или щелевое по сечению) под действием в зоне разряда избыточного давления, превышающего атмосферное.

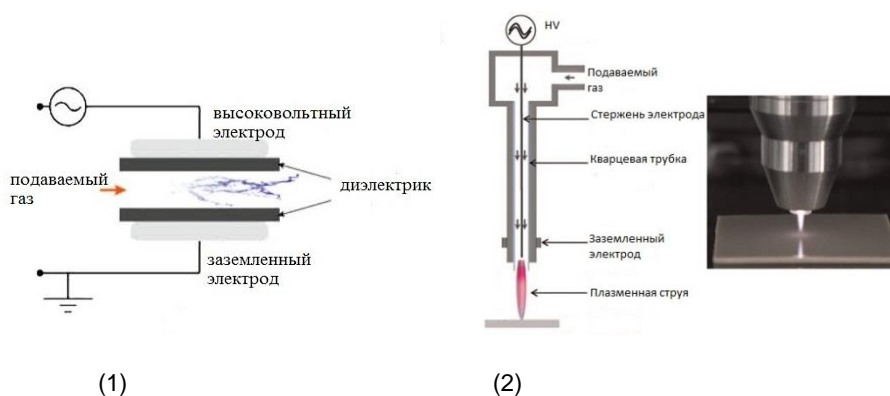


Рис. 3. Плазменные струи на основе барьерного (1) и коронного разрядов (2) [16], [17]

Возбуждение тлеющим, коронным или барьерным разрядом создает неравновесную плазму со средней температурой газа от 20 до 400°С и плотностью заряженных частиц, типичной для слабоионизованных газов (не выше 10^{11} – 10^{12} см), и концентрацией активных частиц до 0,1 см. При температурах, близких к комнатным, такую плазму называют холодной или нетепловой [18].

Среди источников холодной плазмы атмосферного

давления известны генераторы на основе плазменной струи барьерного разряда (рис. 4) [19]. Для формирования газового потока в них используют кварцевую трубку, которая в свою очередь служит диэлектрическим барьером и предотвращает разряд внутри нее от перехода в сильноточную искровую или дуговую стадии.

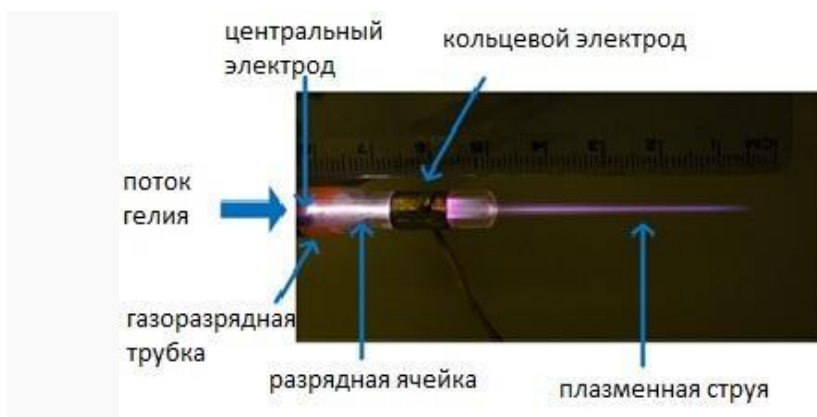


Рис. 4. Плазменная струя на основе гелия.

Внутренний высоковольтный электрод, которым обычно служит металлический стержень, располагают по оси трубки, а внешний кольцевой — заземляют (рис. 5) [20].

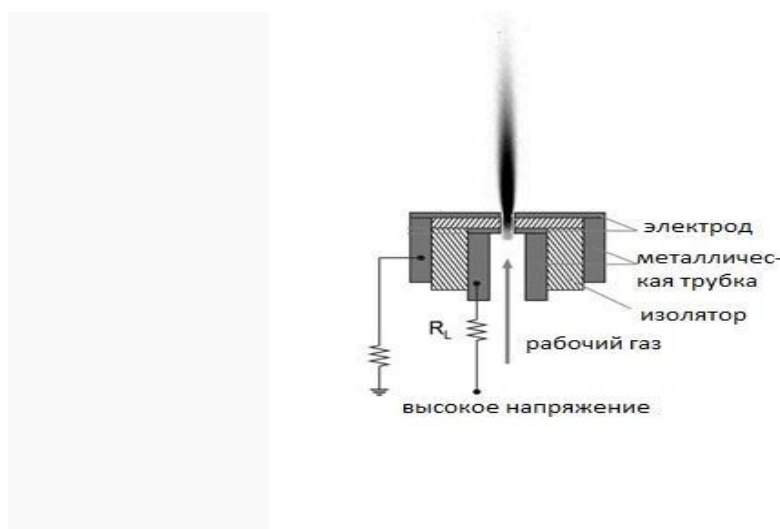


Рис. 5. Плазменный генератор.

Поток плазмы на выходе генератора формируется за счет пропускания рабочего газа сквозь разрядную ячейку, которой обычно является кварцевая трубка с коаксиальной системой электродов «внутренний стержень - внешнее кольцо» [19]. Благодаря высокому потенциалу, переносимому волной ионизации из области разряда вдоль потока газа, распространение плазменной струи в окружающем воздухе приводит к генерированию химически активных форм кислорода и азота. Тем самым, имея возможность управлять электрофизическими параметрами разряда, становится возможным формирование необходимого набора плазмохимических реакций на выходе из генератора. В то же время течение газа может оказывать влияние на ток, переносимый струей, напряжение на разрядном промежутке и энерговыделение в области разряда .

Глава 2. Генерирование плазменной струи на основе барьерного разряда в потоке гелия

Ниже представлено описание экспериментальной установки и параметров её работы. Установка создана в результате коллаборации сотрудников физического факультета СПбГУ и Института электрофизики и электроэнергетики РАН для выполнения исследований по междисциплинарному проекту «Получение холодной атмосферной плазмы барьерного разряда и разработка способов управления её параметрами для исследования механизмов её деструктивного воздействия на бактериальные клетки и биоплёнки» (грант РФФИ 16-08-00870, руководитель: к.ф.-м.н., доцент А.А. Кудрявцев).

2.1 Экспериментальная установка для генерирования плазменной струи на основе барьерного разряда в потоке гелия

В настоящей работе источником гелиевой плазменной струи атмосферного давления служил объёмный барьерный разряд, инициируемый в потоке газа. Для его генерирования была разработана и собрана экспериментальная установка (рис. 6), которая состоит из:

- генератора импульсов Agilent-3210A (Agilent Technologies, USA) (1);
- источника постоянного напряжения Б5-71/2-ПРО (ПРОФИГРУПП, Россия) (2);

- транзисторного усилителя (3);
- импульсного высоковольтного повышающего трансформатора (4);
- газоразрядной ячейки (5);
- системы электрических измерений параметров разряда (6);
- системы контролируемого газонапуска (использован регулятор расхода газа Bronkhorst EL-Flow F-201AC) (7).

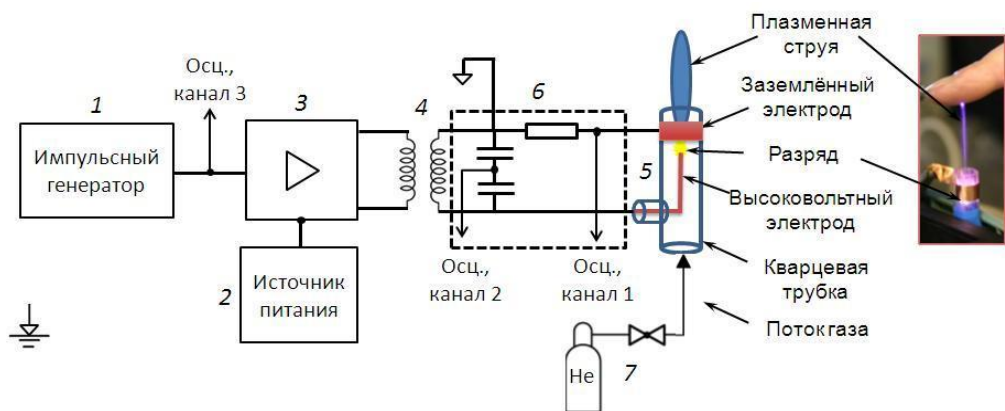


Рис.6. Схема экспериментальной установки для генерирования и диагностики плазменной струи на основе барьерного разряда в потоке гелия (1 – импульсный задающий генератор, 2 – низковольтный источник постоянного напряжения, 3 – транзисторный усилитель, 4 – импульсный высоковольтный трансформатор, 5 – газоразрядная ячейка, 6 – система электрических измерений, 7 – система газонапуска).

Газоразрядную ячейку изготовили из кварцевой трубки, которую оборудовали коаксиальной системой электродов «внутренний стержень - внешнее кольцо» и

фитингом для подвода газа. Внутренний электрод, выполненный из медной проволоки диаметром 1,5 мм, разместили вдоль оси симметрии трубки на расстоянии 7,5 мм от её края. На него подавали высокое напряжение. Внешний электрод представлял собой медную фольгу шириной 5 мм, намотанную на трубку на расстоянии 5 мм от её края. На рисунке 7 представлен эскиз газоразрядной ячейки плазменного генератора, реализованного в настоящей работе.

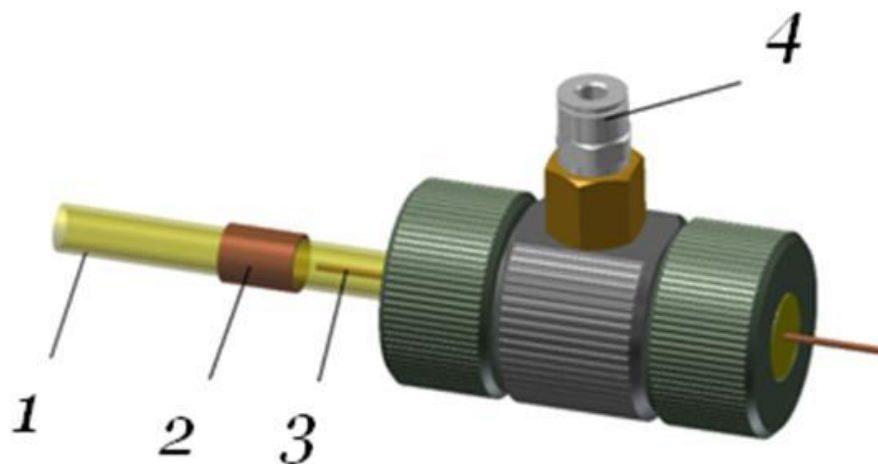


Рис. 7. Эскиз газоразрядной ячейки плазменного генератора на основе барьерного разряда (1 – кварцевая трубка, 2 – заземлённый электрод, 3 – высоковольтный электрод, 4 – фитинг для газонапуска)

Принцип работы генератора плазменной струи заключается в инициировании барьерного разряда в потоке газа, пропускаемого сквозь межэлектродный

промежуток. Характеристики формируемой плазменной струи на выходе из разрядной ячейки, главным образом, зависят от параметров напряжения питания (типа сигнала: синусоидальный/ импульсный; его частоты и амплитуды; скорости фронта нарастания и др.) [21]. Однако, очевидно, что и газодинамические характеристики течения газа могут существенно влиять на инициирование разряда и получение плазменной струи. В настоящей дипломной работе выполнена проверка этой гипотезы.

2.2 Газодинамические условия формирования плазменной струи

Контроль объёмного расхода гелия осуществлялся с помощью регулятора расхода газа Bronkhorst EL-Flow F-201AC с верхним пределом регулирования 30 норм.л/мин по воздуху.

Скорость газового потока на выходе из разрядной ячейки варьировали путём изменения объёмного расхода газа в пределах до 40 л/мин и использованием разрядных ячеек с разным внутренним диаметром: 7,49 и 5,58 мм. Таким образом, скорость потока газа соответствовала диапазону 0,5 – 30 м/с и обеспечивала ламинарный и турбулентный режимы истечения гелия в воздух.

При описании эффектов турбулентности обычно используют число Рейнольдса. Это безразмерная величина, определяющая количественную оценку

отношения сил инерции и вязкости газового потока. Значение числа Рейнольдса R_e рассчитывается по формуле:

$$R_e = \frac{\rho_{He} \cdot v \cdot d}{\mu_{He}} \quad (1)$$

где $\rho_{He} = 0,173 \text{ кг/м}^3$, $\mu_{He} = 18,64 \text{ мкН} \cdot \text{с/м}^2$ – плотность и динамическая вязкость гелия при атмосферном давлении и температуре 20°C соответственно; v – скорость течения газа, м/с; d – диаметр выходного отверстия газоразрядной ячейки, м. Газовые потоки, рассмотренные в данной работе, характеризуются числами Рейнольдса от 20 до 1500.

Взаимосвязь скорости истечения газа из выходного отверстия плазменного генератора и длины формируемой плазменной струи выявлена в работах [22]. Показано, что длина струи существенно уменьшается при переходе от ламинарного течения газа к турбулентному, и её зависимость от скорости пропускания газа становится слабо выраженной (рис. 8).

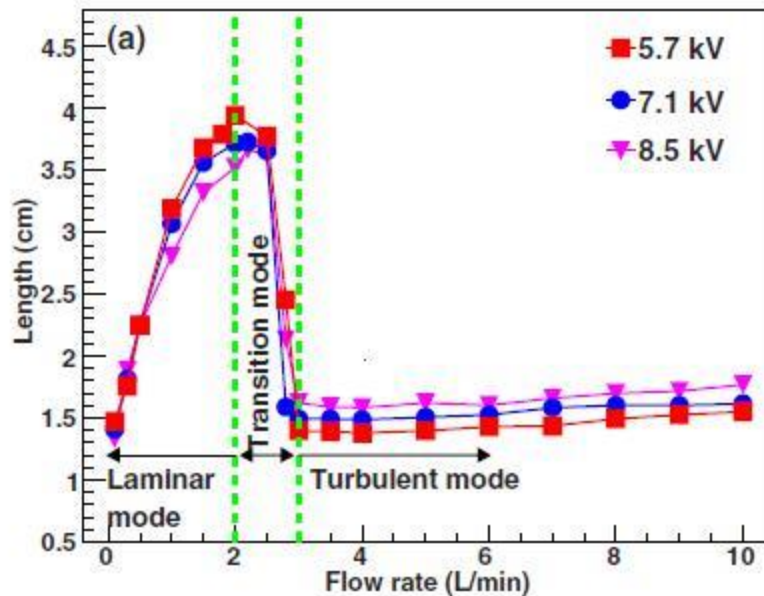


Рис. 8. Зависимость длины плазменной струи от объёмного расхода газа при различных величинах напряжения питания [22].

Похожие закономерности получены для плазменного генератора, исследуемого в настоящей работе. Их описание и анализ представлены в Главе 3.

Режим течения газа определяли из полученных фотографических изображений плазменной струи. Фотоснимки обрабатывали для получения данных о длине струи. Методика её определения была построена на предположении, что граница плазменного образования соответствует точке на фотоснимке с яркостью, равной 5 % от её максимального значения. Все фотографии были обработаны с учётом этого допущения. На рис. 9 в качестве примера представлены фотографии плазменной

струи, полученные для ламинарного ($Re = 205$) и турбулентного ($Re = 815$) режимов истечения гелия со скоростями 4 и 16 м/с соответственно.



Рис. 9. Фотографии гелиевой плазменной струи, сформированной в ламинарном (а) и турбулентном (б) газовых потоках, направленных вверх

Влияние газодинамических условий на формирование плазменной струи рассмотрены для двух случаев направления газового потока, определяемого ориентацией газоразрядной ячейки: вверх (upstream) и вниз (downstream) (рис. 10).

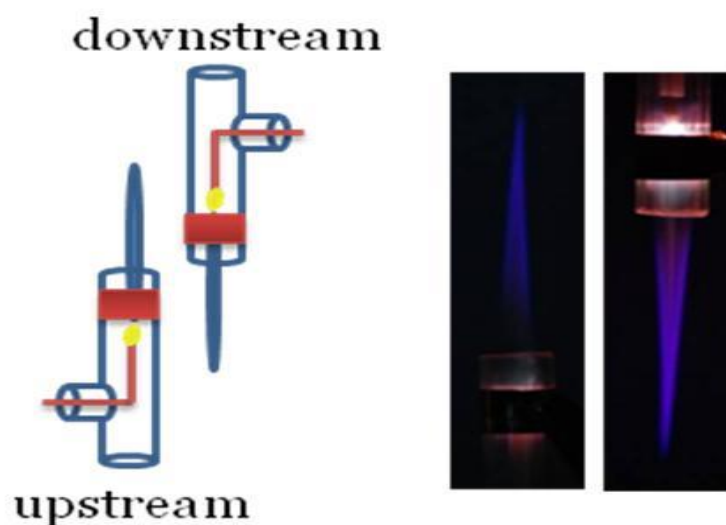


Рис. 10. Направления ориентации газоразрядной ячейки при исследовании газодинамических условий формирования гелиевой плазменной струи в окружающем воздухе

2.3 Электрические измерения параметров разряда

Диагностика разряда и плазменной струи включала в себя электрические измерения параметров разряда (напряжения на разрядной ячейке и тока, проходящего через неё) и фотографирование плазменной струи. Для фотографирования использовался цифровой фотоаппарат Nikon D80 с объективом Sigma 28-200 Macro.

Для измерения напряжения на разрядной ячейке был изготовлен емкостной делитель с экспериментальным коэффициентом деления 1:1333. Ток, проходящий через разрядную ячейку, определялся посредством измерения падения напряжения на резисторе с сопротивлением 89 Ом (рис. 11). Сигналы записывались осциллографом Agilent DSO-X 2014A (Agilent Technologies, USA) (см., например, рис. 12).

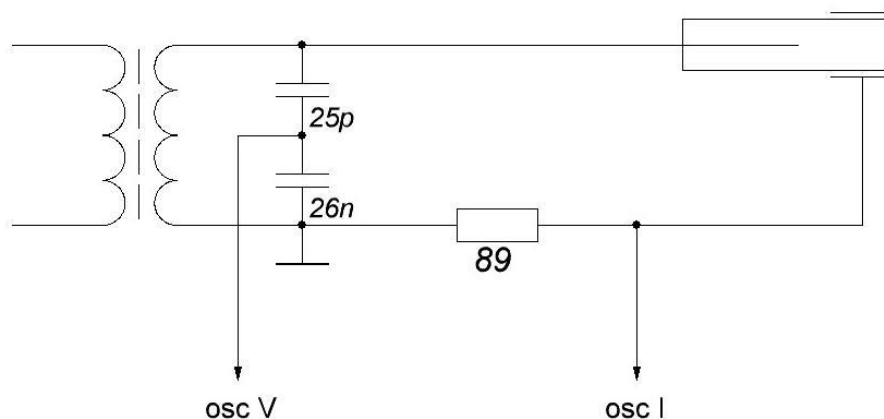


Рис. 11. Система электрических измерений, используемая в работе

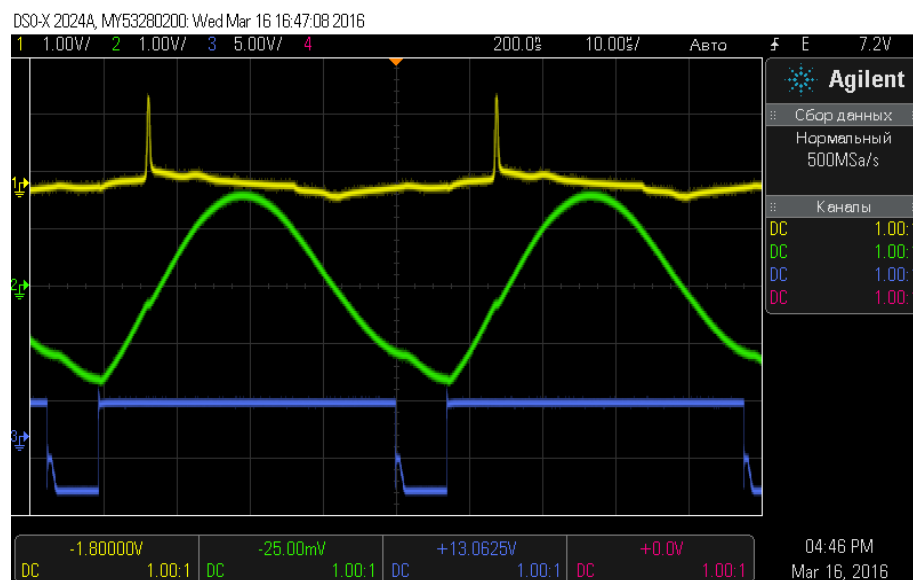


Рис. 12. Типичная осциллограмма записываемых сигналов: канал 1 – сигнал с резистивного шунта (верхний); канал 2 – сигнал с делителя напряжения(средний); канал 3 – сигнал с силового ключа(нижний) (см. схему установки на рис. 6).

Собранный источник питания в резонансе формирует сигнал, близкий к синусоиде, с частотой 21 кГц и размахом U_{pp} 4-6 кВ (рис. 12 – канал 2, рис. 13, 14 – синяя кривая). Измеренный токовый сигнал включает в себя ток смещения и ток проводимости (ток разряда). Основной пробой приходится на возрастающую часть сигнала напряжения, во время которой импульс тока в максимуме I_{max} достигает десятков мА. Во время спада напряжения формируется второй (обратный) токовый импульс величиной несколько единиц мА (его почти не видно).

В проведенных экспериментах частота следования импульсов соответствовала её резонансному значению, то есть 21 кГц. Напряжение низковольтного источника

питания (2) варьировалось от минимального значения, необходимого для формирования струи (около 21 В), до 40 В.

Ниже представлен результат обработки снятых осциллограмм: сигналы напряжения на разрядной ячейке и тока, проходящего через неё. На рис. 13(а) и 13(б) – сигналы $U(t)$ и $I(t)$ для газоразрядной ячейки с внутренним диаметром 7,49 мм при скорости газового потока, направленного вверх, 1,4 м/с ($Re = 95$, ламинарный режим) (рис. 13а) и 15 м/с ($Re = 1045$, турбулентный режим).

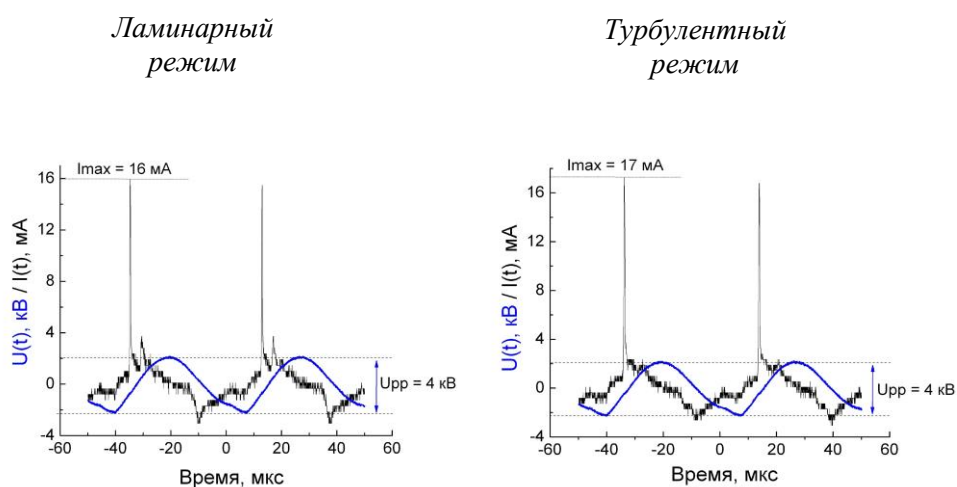


Рис. 13. Сигналы напряжения на разрядной ячейке и тока, протекающего через неё, полученные для ячейки с внутренним диаметром 7,49 мм при скорости газового потока 1,4 (а) и 15 м/с (б). Направление газового потока – вверх.

На рис. 14(а) и 14(б) представлены сигналы $U(t)$ и $I(t)$ для газоразрядной ячейки с внутренним диаметром 5,58 мм при скорости газового потока, направленного вверх,

1,1 м/с ($R_e = 58$, ламинарный режим) (рис. 14а) и 17 м/с ($R_e = 868$, турбулентный режим).

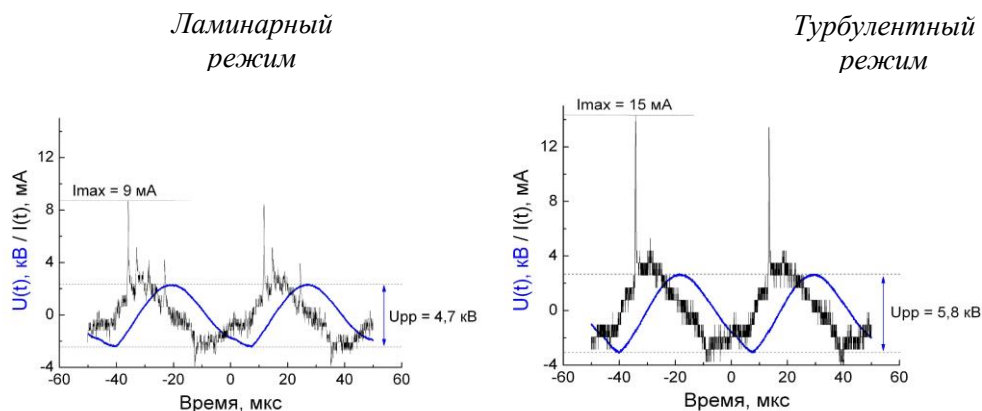


Рис. 14. Сигналы напряжения на разрядной ячейке и тока, протекающего через неё, полученные для ячейки с внутренним диаметром 5,58 мм при скорости газового потока 1,1 (а) и 17 м/с (б). Направление газового потока – вверх.

Сигналы напряжения и тока получены для разрядных ячеек с внутренним диаметром 7,49 и 5,58 мм и широкого диапазона варьирования скорости газового потока (от 0,5 до 30 м/с), который охватывает ламинарный и турбулентных режимы течения газа. Для характеристики закономерностей влияния скорости газового потока на электрофизические параметры разряда будем говорить о размахе сигнала напряжения (peak-to-peak value) U_{pp} и величине максимального тока в импульсе I_{max} .

В ламинарном газовом потоке за один период напряжения (при его возрастании) на осциллограмме сигнала тока появляется несколько пиков (токовых

импульсов, пробоев). В турбулентном режиме наблюдается один выраженный импульс тока. Это может быть, связано с различной степенью разогрева разрядной ячейки при пропускании через неё газа с разной скоростью. Повышение температуры диэлектрика приводит к повышению его электрической проводимости, что обуславливает «растекание» заряда по поверхности и, следовательно, к уменьшению его плотности. Напряженность внутреннего индуцированного поля падает и ограничивает рост тока микрозаряда. Однако, чтобы сбросить весь накопившийся заряд со стенки разрядной ячейки, возникают последующие токовые импульсы. Таким образом, при «растекании» заряда по поверхности, которое сильнее выражено в условиях повышенной температуры диэлектрика его величина снимается порционно, за несколько микропробоев. Именно такой случай можно наблюдать при ламинарном течении газа. С увеличением скорости газонапуска степень разогрева поверхности кварца уменьшается. Поэтому плотность заряда остаётся достаточно высокой и обеспечивает электрическое поле напряженностью, достаточной для формирования одного импульса тока, но с большей амплитудой.

С уменьшением расстояния между электродами (при использовании ячейки с меньшим внутренним диаметром) влияние режима газового течения проявляется более ярко:

в турбулентных потоках увеличивается и размах напряжения, и величина импульса тока. Это говорит о том, что инициирование и поддержание разряда в турбулентных потоках требует больше энергии, чем при ламинарном течении газа.

2.4 Методика расчёта энергетических характеристик разряда

Полученные сигналы напряжения и тока обрабатывали для определения энергетических характеристик разряда: количества вложенной за импульс энергии W и мощности разряда P . Их расчёт проводили путём интегрирования вольт-кулоновской характеристики (ВКХ) разряда (метод фигур Лиссажу) [23], [24].

Метод ВКХ, или метод фигур Лиссажу используется для определения мощности барьерного разряда, который в общем случае представляет собой серию микрозарядов. Обычно для измерения энергии, вложенной за период приложенного напряжения, используют емкостной шунт и напрямую измеряют количество переносимого заряда. Энергия, потребляемая за один период – это площадь замкнутой кривой, построенной в координатах «заряд - напряжение» (фигур Лиссажу). Её форма содержит много важной информации о типе нагрузки, которой является разряд. Например, для идеальной емкостной нагрузки фигуры Лиссажу – это прямые линии, а резистивная

нагрузка даёт эллипс. В большинстве приложений барьерного разряда ВКХ нагрузки представляет собой фигуру, близкую к параллелограмму, из которой можно узнать сведения о напряжении на разрядном промежутке, его ёмкости и ёмкости диэлектрических барьеров [23].

В настоящей работе для построения ВКХ разряда ток, измеренный с помощью резистивного шунта (канал 1, рис. 12), $I(t)$ интегрировали по времени для определения величины переносимого заряда:

$$Q(t) = \int I(t)dt \quad [\text{Кл}], \quad (2)$$

где для исследуемых условий $I(t) = \text{osc}I(t)/R$, $R=89 \text{ Ом}$. После этого строили фигуры Лиссажу зависимость величины переносимого заряда $Q(t)$ от напряжения питания $U(t)$. Их площадь равна количеству энергии, вложенной в разряд за период приложенного напряжения:

$$W = \int Q(t)dU/N \quad [\text{Дж/имп}], \quad (3)$$

где N – количество периодов, записанных в осциллограммах. В данной работе длительность всех регистрируемых сигналов была установлена равной двум периодам.

Отсюда мощность разряда вычисляли по формуле:

$$P = W*f \quad [\text{Вт}], \quad (4)$$

где $f = 21 \text{ кГц}$ – частота напряжения питания.

Алгоритм обработки осциллограмм сигналов напряжения и тока и расчёта энергетических характеристик по методу ВКХ был реализован в среде

SciLab-5.5.2. Текст кода представлен в Приложении.

Основные закономерности влияния скорости газового потока на энергетические характеристики барьерного разряда представлены в Главе 3.

Глава 3. Влияние скорости газового потока на электрические и энергетические характеристики барьерного разряда при генерировании гелиевой плазменной струи

Настоящая глава содержит результаты обработки экспериментальных данных, их обобщение и анализ. В первой части исследования было рассмотрено влияние скорости газового потока (режима течения газа) на формирование гелиевой плазменной струи в окружающем воздухе; выявлены зависимости длины струи от условий газонапуска для газовых потоков, направленных вертикально вверх и вертикально вниз; выполнено сравнение с результатами других авторов. Вторая часть исследования была посвящена изучению влияния скорости газового потока на электрические и энергетические характеристики барьерного разряда.

3.1. Влияние скорости газового потока на формирование гелиевой плазменной струи в окружающем воздухе

Газодинамические условия формирования плазменной струи барьерного разряда в потоке гелия изложены в Главе 2, п. 2.2. Здесь приведены результаты обработки фотографических изображений плазменной струи – данные о её длине – в зависимости от объёмного расхода газа, скорости газового потока и числа Рейнольдса,

характеризующего режим течения газа (рис. 15, 16).

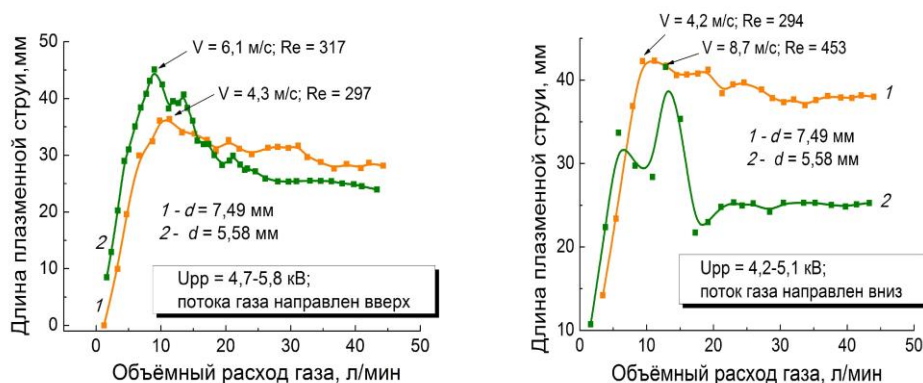


Рис. 15. Зависимость длины струи от объёмного расхода газа для разрядных ячеек с внутренним диаметром 7,49 мм (желтая кривая - 1 ячейка) и 5,58 мм (зеленая кривая - 2 ячейка) для потоков гелия, направленных вверх (а - ламинарный) и вниз (б - турбулентный)

С переходом в турбулентный режим напуска газа длина плазменной струи заметно уменьшается. Причем переходный режим, при котором длина струи то увеличивается, то уменьшается, становится более выраженным при направлении потока гелия вниз и использовании разрядной ячейки меньшего диаметра.

Удобнее описывать поведение струи в зависимости от скорости газового потока, а не от объёмного расхода газа: кривые для разных диаметров выходного отверстия накладываются друг на друга и можно говорить об универсальности выявленной зависимости. Например, при ламинарном течении газа ($Re \leq 250$) длина плазменной струи увеличивается до 35...40 мм с увеличением скорости газового потока приблизительно до 5 м/с (для

направления вверх). При переходе в турбулентный режим ($V > 13$ м/с, $Re > 700...800$) длина плазменной струи, направленной вверх, падает до 25 мм. Для ячеек с большим внутренним диаметром установление турбулентного режима наступает раньше.

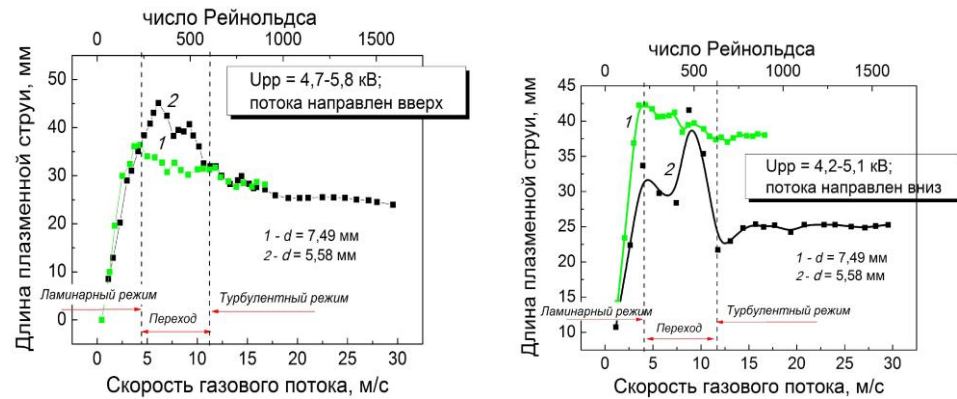


Рис. 16. Зависимость длины струи от скорости потока гелия и числа Рейнольдса для разрядных ячеек с внутренним диаметром 7,49 мм (кривая 1) и 5,58 мм (кривая 2) для потоков гелия, направленных вверх (а) и вниз (б)

Направление потока гелия вниз приводит к незначительному уменьшению длины струи и более неопределённой зависимости от режима течения газа. Для потоков, направленных вниз, ламинарный режим заканчивается приблизительно при тех же значениях скорости газового потока, однако, в установившемся турбулентном режиме для ячейки с большим диаметром (7,49 мм) длина струи уменьшается на 10 мм и становится равной около 37 мм, в то время как для ячейки с диаметром 5,58 мм её значение устанавливается на 25 мм.

Таким образом, целесообразно описывать поведение плазменной струи в зависимости от газодинамических условий формирования потока гелия в терминах скорости (м/с), а не объёмного расхода газа (л/мин). При ламинарном течении газа ($V < 5$ м/с, $Re \leq 250$) длина формируемой плазменной струи достигает значений 40...45 мм. В установившемся турбулентном режиме ($V > 15$ м/с, $Re > 700...800$) она падает до 25 мм – для ячейки с диаметром 5,58 мм, и до 30...37 мм – для ячейки с диаметром 7,49 мм.

3.2 Влияние скорости газового потока на электрические и энергетические характеристики барьерного разряда в потоке гелия

Общей тенденцией для всех записанных сигналов при варьировании расхода газа является то, что в ламинарном режиме на осциллограммах тока можно различить большее количество отдельных микрозарядов, чем в турбулентном. А с уменьшением длины разрядного промежутка основной импульс тока падает. Отсюда следует, что, во-первых, турбулентный режим способствует стабилизации горения разряда: весь накопившийся заряд снимается за один пробой (рис. 13(а)-(б)). Во-вторых, с уменьшением расстояния между электродами развитие электронных лавин заканчивается раньше, и ток формируемого микрозаряда слегка

уменьшается (рис. 13(а) и 14(а)).

К электрическим характеристикам разряда будем относить размах напряжения питания U_{pp} и максимальную высоту импульса тока I_{max} , регистрируемую на возрастающем полупериоде сигнала напряжения.

Энергетические характеристики разряда определяются количеством энергии, вложенной за период напряжения питания в разряд, W и мощностью разряда P . На рисунках 17 и 18 представлены ВКХ, рассчитанные для сигналов, осциллограммы которых изображены на рис. 13(а)-(б) и 14(а)-(б).

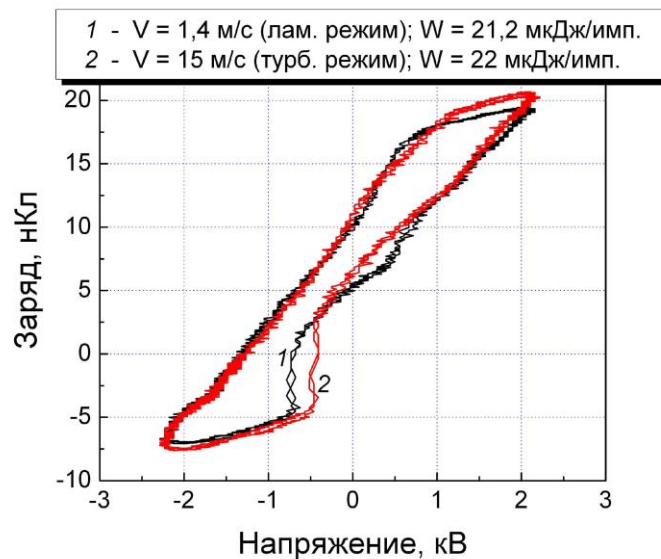


Рис. 17. Вольт-кулоновские характеристики разряда, полученные для ячейки с внутренним диаметром 7,49 мм при скорости газового потока 1,4 (1) и 15 м/с (2). Направление газового потока – вверх.

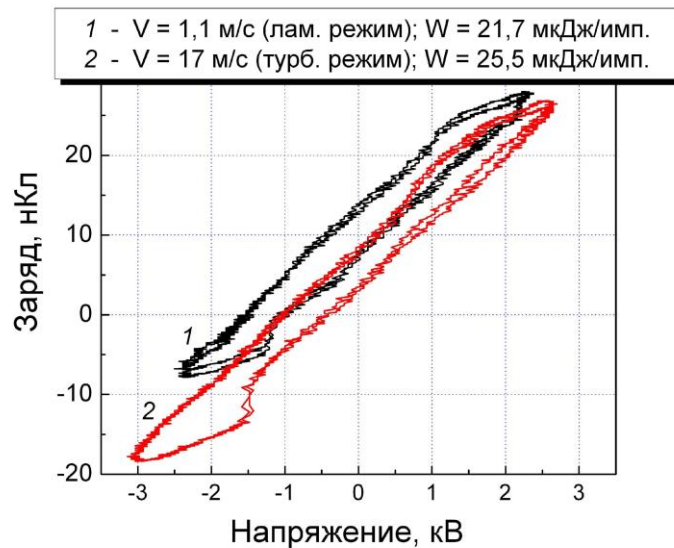


Рис. 18. Вольт-кулоновские характеристики разряда, полученные для ячейки с внутренним диаметром 5,58 мм при скорости газового потока 1,1 (1) и 17 м/с (2). Направление газового потока – вверх.

Для разрядной ячейки с внутренним диаметром 7,49 мм режим течения газа практически не влияет на энерговыделение в разряде. При скоростях газового потока 1,4 и 15 м/с количество вложенной за импульс энергии составляет 21,2 и 22 мкДж/имп. При этом мощность разряда составляет 0,44 и 0,46 Вт. Однако с уменьшением расстояния между электродами, в случае использования разрядной ячейки с меньшим внутренним радиусом, скорость пропускания газа через разрядный промежуток заметно влияет на энергетические характеристики разряда. В турбулентном режиме увеличивается количество переносимого заряда (пик импульса тока возрастает, рис. 14(б)), это увеличивает

количество вкладываемой энергии: 21,7 мкДж/имп. – при скорости 1,1 м/с и 25,5 мкДж/имп – при 17 м/с. Мощность разряда увеличивается от 0,45 до 0,53 Вт.

Следовательно, количество энергии, вкладываемой в инициирование и поддержание барьерного разряда в потоке гелия, растёт при увеличении скорости газового потока. Этот тезис иллюстрирует рис. 19, на котором представлена зависимость энергии W от скорости газового потока. Она линейно растёт с увеличением скорости продува разрядной системы. Это может быть связано с отводом энергии за счёт охлаждения.

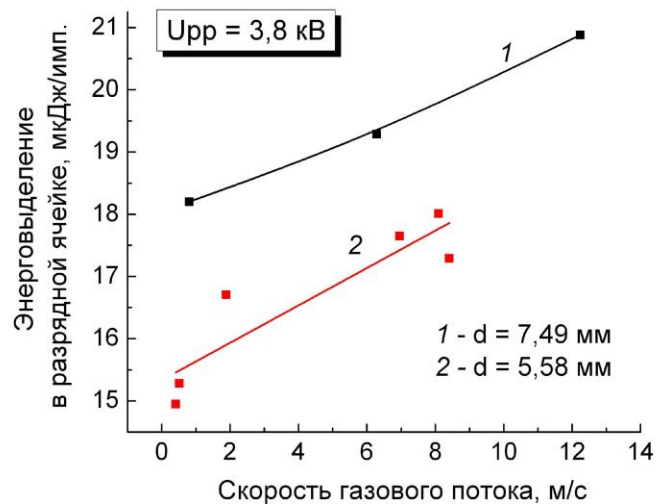


Рис. 19. Зависимость количества энергии, вкладываемой в разрядную систему, от скорости потока газа для разрядных ячеек с внутренним диаметром 7,49 мм (1) и 5,58 мм (2)

Выводы

Таким образом, анализ полученных данных о влиянии скорости газового потока на формирование плазменной струи и электрические и энергетические характеристики барьерного разряда позволяет сделать следующие выводы:

- 1) при ламинарном течении газа ($V < 5$ м/с, $Re \leq 250$) длина формируемой плазменной струи достигает значений 40...45 мм, в то время как в установившемся турбулентном режиме ($V > 15$ м/с, $Re > 700...800$) она падает до 25 мм – для ячейки с диаметром 5,58 мм, и до 30...37 мм – для ячейки с диаметром 7,49 мм;
- 2) токи возникающих микрозарядов в исследуемой разрядной системе достигают величин порядка 15...17 мА при размахе напряжения на электродах 4..5 кВ;
- 3) турбулентный режим способствует стабилизации горения разряда;
- 4) количество энергии, вкладываемой в инициирование и поддержание барьерного разряда в потоке гелия, растёт при увеличении скорости газового потока от 10 до 30 мкДж/имп. при размахе напряжения 2...5 кВ.

Заключение

В работе выполнено экспериментальное исследование влияния режима течения газа со скоростями 0,5...30 м/с на генерирование в нём плазменной струи барьерного разряда. Подтверждена гипотеза о влиянии скорости течения газа на электрические и энергетические параметры барьерного разряда в потоке гелия. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при разработке генераторов плазменных струй на основе барьерного разряда важно учитывать не только параметры системы питания, но и режим газонапуска. Показано, что поток газа влияет на формирование струи и на характеристики разряда, которые, в свою очередь, определяют свойства генерируемой плазмы.

В дальнейшем предполагается выполнить серию экспериментов для подтверждения ряда сделанных здесь предположений. В частности, все эксперименты будут дополнены измерениями степени разогрева разрядной ячейки и газового потока.

Исследования по данному направлению ориентированы на разработку подходов к созданию способов применения генератора плазменной струи для антибактериальной обработки поверхности ран. Эти работы проводят в СПбГУ на медицинском факультете в рамках проекта «Бактерицидный эффект и регенерация кожных ран при воздействии холодной плазмы атмосферного давления»

под руководством профессора кафедры физиологии О.В.
Рыбальченко.

Список литературы

1. Plasma Medicine. Applications of Low-Temperature Gas Plasmas in Medicine and Biology. Cambridge University Press, Cambridge UK, 2012, 416 pp.
2. M. Laroussi. From killing bacteria to destroying cancer cells: 20 years of plasma medicine // Plasma Process. Polym. 2014, 11, 1138–1141.
3. E. Stoffels, A. J. Flikweert, W. W. Stoffels and G. M. W. Kroesen // Plasma needle: a non-destructive atmospheric plasma source for fine surface treatment of (bio)materials. - Plasma Sources Sci. Technol. 2002, 11, 383.
4. Svetlana A. Ermolaeva et al. // Bactericidal effects of non-thermal argon plasma in vitro, in biofilms and in the animal model of infected wounds, Journal of Medical Microbiology 60 (2011) 75-83.
5. S. Wu, Y. Cao, and X. Lu // The State of the Art of Applications of Atmospheric-Pressure Nonequilibrium Plasma Jets in Dentistry.
6. Fridman G. et al. // Applied plasma medicine, Plasma Processes and Polymers. – 2008. – T. 5. – №. 6. – С. 503-533.
7. C. Hoffman, C. Berganza and J. Zhang // Cold Atmospheric Plasma: methods of production and application in dentistry and oncology, Medical Gas Research (2013) 3:21.
8. J Raiser and M Zenker. Argon plasma coagulation for open surgical and endoscopic applications: state of the art // Journal of Physics D: Applied Physics 2006 J. Phys. D: Appl.

Phys. 39 3520.

9. Julia Heinlin, Gregor Morfill, Michael Landthaler et. al. // Plasma medicine: possible applications in dermatology, JDDG: Journal der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft 8 (12) (2010) 968–976.

10. Gregory Fridman, et. Al. // Plasma Chemical Plasma Process Vol. 26, 425–442, 2006

11. E. Stoffels, A. J. Flikweert, W. W. Stoffels, G. M. W. Kroesen // Plasma Sources Sci. Technol. 11 (2002)

12. А.В. Самусенко, Ю.К. Стишков // Электрофизические процессы в газах при воздействии сильных электрических полей, Санкт-Петербург 2011.

13. Ю.П. Райзер // Физика газового разряда, Издательский Дом Интеллект, Долгопрудный 2009.

14. Ю.П. Пичугин // Структура барьерного разряда и синтез озона.

15. В. Г. Самойлович , В. И. Гибалов , К. В. Козлов // Физическая химия барьерного разряда, 1989.

16. C. Tendero, Ch. Tixier, P. Tristant, et. Al. // Spectrochimica Acta Part B, Vol. 61, 2-30, 2006.

17. Fricke K, Koban I, Tresp H, Jablonowski L, Schröder K, Kramer A, Weltmann K-D, von Woedtke T, Kocher T // Atmospheric pressure plasma: a highperformance tool for the efficient removal of biofilms. PLOS ONE 2012, 7(8):e42539.

18. Э.А. Соснин, В.А. Панарин В.С. Скакун, В.Ф. Тарасенко, Д.С. Печеницин, В.С. Кузнецов // Источник

плазменной струи атмосферного давления, формируемой в воздухе или азоте при возбуждении барьерным разрядом, Журнал технической физики, 2016.

19. A. Shashurin, M. Keidar, S. Bronnikov, R. A. Jurjus, M. A. Stepp // Applied Physics Letters 93 (18), 181501.

20. J. Kolb // Applied Physics, 2008.

21. Q. Xiong et al. // Length control of He atmospheric plasma jet plumes: Effects of discharge parameters and ambient air // Physics of Plasmas 16 (2009) 043505.

22. Li, Q., Li, J. T., Zhu, W. C., Zhu, X. M., & Pu, Y. K. (2009) // Effects of gas flow rate on the length of atmospheric pressure nonequilibrium plasma jets. Applied Physics Letters, 95(14), 141502.

23. Ulrich Kogelschatz // Dielectric-barrier Discharge: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications // Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 23, No. 1 . – 2003. – 1-46.

24. Stanislav Pekarek // Experimental study of surface dielectric barrier discharge in air and its ozone production // Journal of Physics D: Applied Physics 45 (2012) 075201.

Приложение

```
0001 cd d:\Osc
0002
0003 mode(0); // Display mode
0004 ieee(2); // Display warning for floating point exception
0005
0006 f=21e3; //частота следования импульсов, Гц
0007
0008 // считывание данных из файлов с осциллограммами
0009 OscI=read('scope_7_1.csv',-1,2);
0010 OscU=read('scope_7_2.csv',-1,2);
0011
0012 t=OscI(:,1); //задание массив времени
0013 N=length(t) //определение размера массива
0014 delta_t=(t(N)-t(1))/length(t) //расчёт шага по времени, с
0015
0016 I=-1.7e-4+OscI(:,2)/89; //расчёт тока (А) с учётом смещения сигнала по величине для
    совпадения ВКХ разных импульсов
0017 U=1.3e3*OscU(:,2); //расчёт напряжения (В)
0018
0019 scf(1);
0020 xgrid();
0021 xtitle('voltage/current vs time'); //построение графика сигналов напряжения тока
0022 plot2d(t*1.0e6,U/1000);
0023 plot2d(t*1.0e6,I*1000);
0024
0025 //расчёт энергии интегрированием по периоду
0026 Pow=I.*U; //мгновенная мощность, Вт
0027 for i=1:N;
0028 W(i)=inttrap(Pow(1:i))*delta_t; //энергия, Дж
0029 end;
0030 P=f*W(N)/2.0; //Вт
0031
0032 scf(2);
0033 xgrid();
0034 xtitle('energy vs time');
0035 plot2d(t,W);
0036
0037 //расчёт заряда
0038 for i=1:N;
0039 Q(i)=inttrap(I(1:i))*delta_t; //интегрирование тока по времени
0040 end;
0041
0042 //проверка смещения токового сигнала (ВКХ двух разных периодов должны накладываться друг на
    друга))
0043 scf(3);xgrid();xtitle('Volt-Coulomb characteristic');
0044 //plot2d(U(1:1000),Q(1:1000),4); //lightblue
0045 //plot2d(U(1001:2000),Q(1001:2000),1); //green
0046 plot2d(U(1:2000),Q(1:2000),2);
0047
0048 //энергия по циклу
0049 WW=-1.0e6*(inttrap(U(1:1000),Q(1:1000))+inttrap(U(1001:2000), Q(1001:2000)))/2.0
0050 PP=1.0e-6*WW*f //Вт
0051
0052 write("discharge_VC.txt",[U Q t]); //запись данных рассчитанной ВКХ в файл
```